

氏 名	塩 見 昌 紀
生 年 月 日	
本 籍	兵庫県
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第403号
学位授与の日付	平成13年3月22日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	鋼管・コンクリート複合ばりの変形能と片持型落石覆工への応用に関する研究
論文審査委員(主査)	前川 幸次 (工学部・教授)
論文審査委員(副査)	川村 満紀 (工学部・教授) 山崎 光悦 (工学部・教授) 榎谷 浩 (工学部・助教授) 五十嵐心一 (工学部・助教授)

## 学 位 論 文 要 旨

**ABSTRACT:** A concept is now prevailing, that the 2-step design method like in the earthquake-resistant structural designing shall be applied to the designing of rock-sheds, which receive the unforeseen impact load of rockfall. As the benchmark to be applied to the designing at the level 2 under the ultimate critical state, it is rational to take the energy-absorbency into consideration instead of impact forces as in the past and it is advantageous for such designing that the construction materials have good deformation-capacity. This dissertation is proposing the method to improve the bending-deformation-capacity of reinforced concrete beams (referred to as “RC beams”) or pre-stressed concrete beams (referred to as “PC beams”) by arranging of steel tubes (referred to as “CFST”) as reinforcements on the beam’s compressive side, which delays the crush of concrete on the compression side and buckling of reinforcements. Further, the effectiveness of this method has been verified by both of static and impact load tests and the study has been made for practical use of this method as main beams for the cantilever type rock-sheds, which requires no foundation structures on valley side but fits to the beauties of nature.

### 1. 研究の背景

現在、日本における落石覆工（ロックシェッド）の設計法は落石の衝撃力を静的な荷重に置き換えて許容応力度法で設計しているのが一般的であるが、平成12年に改定された落石対策便覧では“構造物の衝撃力に対する極限耐荷力を明確にしたうえで、構造物の弾塑性変形による吸収エネルギーを把握する必要がある”としながらも、エネルギー概念に基づく設計法が確立されるまでは、許容応力度法を基本とするのが適切であるという考えを打ち出している。

また、現象的な側面から見ると落石は突発的に発生するものであり、落石の規模や時期を予測することは非常に困難である。したがって落石防護工における落石荷重は、耐震設計における地震の大きさと同様、規模や時期の予測が困難であるという点において類似した考え方が適用できる側面を持っており、落石荷重に対しても落石覆工の供用期間中に数回経験するであろう落石（レベル1）に対しては使用限界状態として許容応力度設計を行い、供用期間中に経験する可能性の少ない、極めて大きな落石（レベル2）に対しては終局限界状態とした設計を行う2段階設計法を用いることは合理的な設計法であるとされてきている。またレベル2の設計においては、衝撃的な荷重を受ける構造物が剛であれば衝撃力は大きくなり、柔であれば小さくなることや、応答時間に伴って荷重が変動するにもかかわらず、衝撃荷重の最大値を静的荷重として載荷することは過大設計になりがちであること

等から、エネルギー吸収を指標とした評価が必要となっており、エネルギー概念に基づいた設計法の確立が喫緊の課題となっている。

一方、落石覆工は単に落石を停止させるという性能面のみならずコスト面や美観面からのアプローチも求められている背景がある。落石覆工のうち谷側に柱を持たない構造形式として片持型があるが、片持型は入口付近の圧迫感が少なく、外部からの景観でも最も軽快な構造と考えられる。また、この構造形式は谷側基礎に対する工事が不要である点からも、谷側に反力のとりにくい施工サイトが多いわが国の山岳道路には有効と考えられる。しかし、わが国では門型や逆L型に比べて同一載荷荷重での部材の断面力が大きくなること等から片持形式のシェッドは採用されにくい現状である。したがって、構造的にも十分な耐力を有する片持シェッドの開発は今後の社会資本整備のあり方からも期待されることが考えられる。本研究は、2段階設計法に基づきエネルギーを指標としたレベル2の落石に対しての安全性を高めるために変形能に優れたはりを開発すること、および変形能に優れたはりを用いて景観に優れた片持型のロックシェッドを開発することを目的として行ったものである。

## 2. 鋼管・コンクリート複合ばりの静的および衝撃載荷実験

一般に、RCはりやPCはりの曲げ変形能が十分でない要因は、早期に起こるコンクリートの圧潰とそれに続く圧縮鉄筋の曲げ座屈である。そこで、RCやPCはりの圧縮鉄筋の代わりにコンクリートを充填した円形鋼管（以下、CFSTという）を用いることにした。CFSTは高耐力と高靱性を期待できるばかりでなく、CFSTの周囲のコンクリートが圧潰した後も曲げ剛性の高いCFSTは曲げ座屈を起こしにくい。その結果として、CFSTを用いた鋼管・コンクリート複合はりには、RCやPCはりに比較して十分に大きな曲げ変形能を有すると考えられる。

ここでは、衝撃荷重の作用する落石防護構造物において終局変位に至るまでにより多くのエネルギーを吸収できる曲げ部材の開発を目指して、CFSTを用いたはりの静的および落錘衝撃載荷実験を行った。

実験供試体は図-1に示す矩形ばりを用いた。供試体は圧縮側鋼材にCFSTを配したCFST-PCおよびCFST-RCと鉄筋を配したPCおよびRCの比較で行った。CFSTには孔があけてありコンクリートとの一体化を考慮している。

静的曲げ載荷実験においては、5000kN耐圧試験機を用い、衝撃曲げ載荷実験では17.46kNの重錘を3.1mの高さから自由落下させて行った。

以上の実験から静的載荷のみならず衝撃載荷においても結果の再現性を確認すると同時に、CFST-RCはりは優れた塑性変形能と耐衝撃性を有することがわかった。主な結論はつぎの通りである。

- (1) CFSTを圧縮側補強材として用いたCFST-RCはりは、設計耐力が同じであるRCはりの2倍以上の塑性変形能を示す。
- (2) 孔のないCFSTはりは初期に付着せん断破壊により荷重が低下した。しかし、孔のあるCFSTは終局状態で孔の潰れによる耐力低下が起こる可能性があるため孔の径と配置について検討が必要である。
- (3) 引張側をアンボンドPC鋼棒により緊張したはりは、載荷点の狭い範囲にクラックが集中し、ひび割れ荷重後の耐力、靱性がRCに比べて劣った。

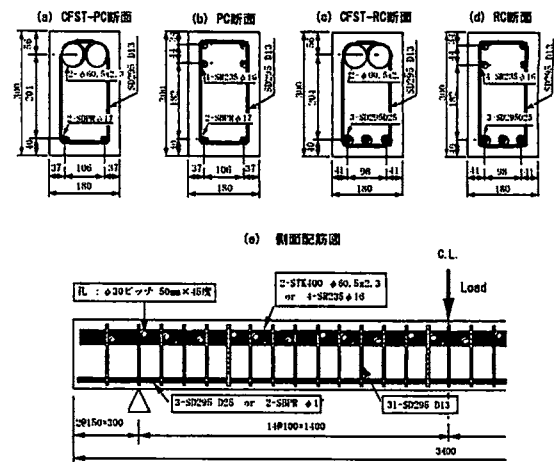


図-1 断面諸元および側面配筋図

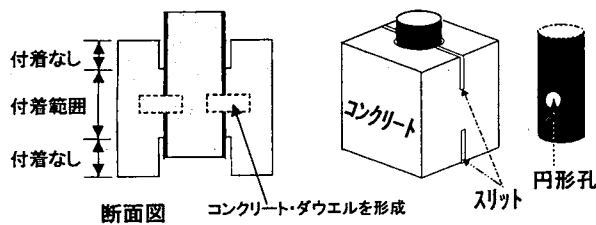


図-2 有孔鋼管供試体概要

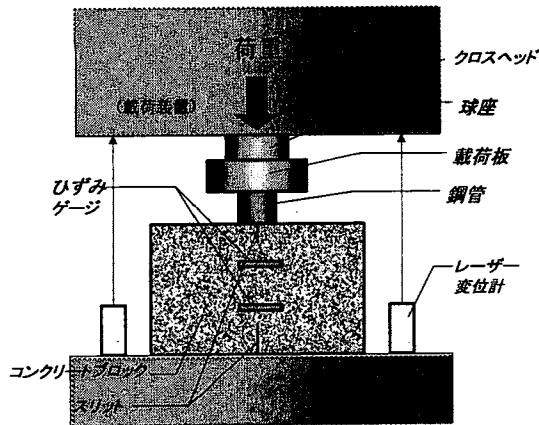


図-3 実験装置

### 3. 鋼管とコンクリートの付着せん断強度

鋼管・コンクリート複合はりにおいては、通常の鉄筋コンクリートはりと同様、鋼管とコンクリートとの一体性の確保が重要である。このような合成構造の合理的設計法を開発するためには、鋼管とコンクリートの付着強度の評価法を確立することが必要である。

ここでは、有孔鋼管を用いることによって形成さ

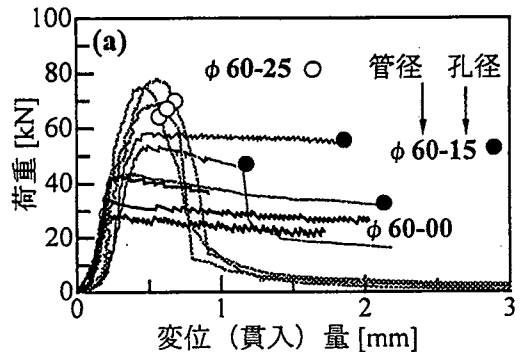


図-4 荷重-変位曲線 (有孔鋼管)

れるコンクリートダウエルのせん断強度を利用する方法と鋼管の表面にコンクリートとの付着強度を増すための種々の加工を施す方法について、押し抜き試験を行い付着強度の特性について検討した。有孔鋼管の供試体概要を図-2に示し、実験方法を図-3に示す。また、有孔鋼管の実験結果を図-4に示した。図-4の各曲線に附した記号●は孔径小、○は孔径大を表わし、無印は孔なしである。図から、有孔鋼管によるコンクリート・ダウエルの効果が確認できた。また、有孔鋼管とコンクリートの押し抜きせん断強度  $F$  の評価の方法として、式 (1) に示すようにコンクリートダウエルのせん断強度  $F_s$  と鋼管とコンクリートの付着せん断強度  $F_b$  の累加強度で表せるものと考え、実験結果から  $C_s$  および  $C_b$  をコンクリートの設計基準強度に対する比率で推定した。

$$F = F_s + F_b \quad (1)$$

$$F_s = C_s A_c \quad (2)$$

$$F_b = C_b A_b \quad (3)$$

ここに、 $A_c$ : ダウエルのせん断面積 (= 孔の面積  $\times 2$ ) および  $A_b$ : 鋼管の付着表面積である。

### 4. 片持型落石覆工を想定した鋼管コンクリート複合 T 形ばりの変形能に関する実験的研究

矩形ばりの曲げ実験結果および有孔鋼管の付着せん断実験結果を踏まえ、片持型の落石覆工を念頭に置き、より実際に近い形状を有するプレストレストコンクリート T 形はりによる CFST の配置効果を静的および重錘落下実験により検討した。最初に図-5 に示す実構造での片持

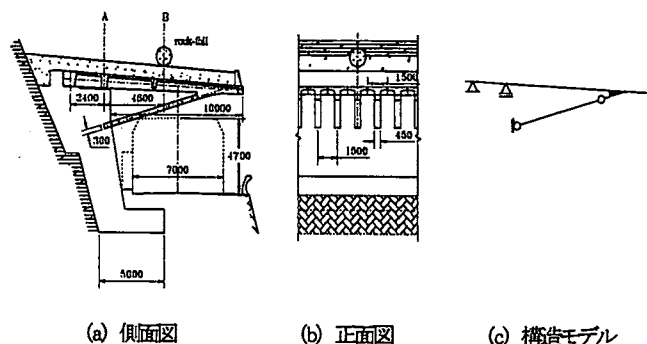


図-5 方杖式片持型落石覆工

型落石覆工を試設計し、次に 1/2 の外寸法を有するモデルを設計した。実物と 1/2 モデルとは抵抗モーメントと曲率において降伏から終局状態に至る過程で近似するように配慮した。ここでは、1/2 モデルにおいて正および負の最大曲げモーメントを生じる断面を有する単純ばりとして 3 点曲げ実験を行った。実験は矩形ばりと同様に CFST を配置した供試体と異形棒鋼を配置した供試体との比較実験として行った。図-6 に負の曲げモーメントの生じる断面を想定し、逆 T 形ばりとして単純載荷した実験結果を示す。これらより次の結論を得た。

(1) プレストレストコンクリートはりにおいても、圧縮側補強材として CFST を用いた供試体は、異形棒鋼を用いた供試体に比べて相対的に塑性変形能に富む。これは、コンクリートの圧潰から圧縮鉄筋の座屈が生じ、耐力を失う過程において CFST が座屈を起こしにくいことに起因すると考えられる。また、この傾向は T 形ばりおよび逆 T 形ばりの双方で確認できた。

(2) 同一条件のもとでの衝撃実験では、異形棒鋼タイプに比べて CFST タイプは残留変位量が小さく、また実験後の供試体も圧縮側が比較的健全であり、落石覆工を考える上で CFST による補強は有益であると考えられる。

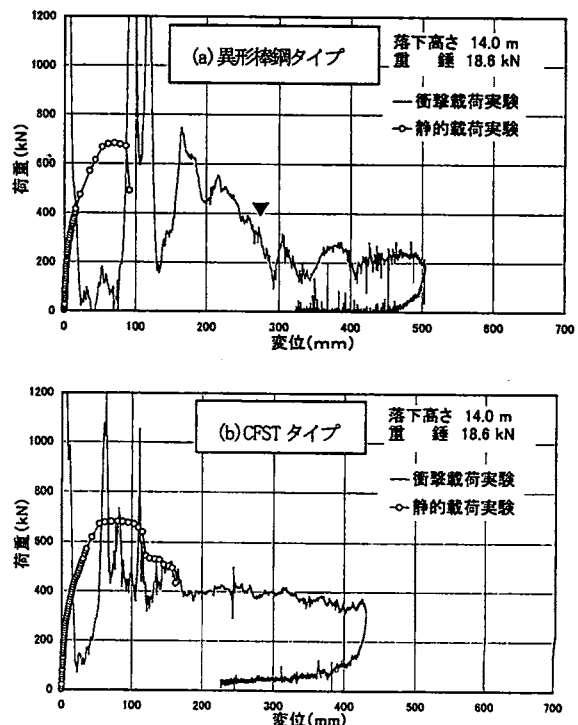


図-6 荷重-変位結果 (逆 T 形供試体)

## 5. 鋼管コンクリート複合ばりを用いた片持型落石覆工の静的および衝撃載荷実験

実際に即して行ったプレストレストコンクリート T 形はりにおいても CFST 配置効果が確かめられたことにより、鋼管コンクリート複合ばりを用いた 1/2 スケールモデルでの構造物の実験を行い、これまで単純ばりで確認できた変形能が、実際の構造系においても再現されることと、想定する構造物全体の挙動を確認した。実験は静的載荷と衝撃載荷で行った。写真-1 に静的載荷実験状況を示し図-7 に載荷重-載荷点変位および仕事量-載荷点変位の結果を示す。図-7 において実線で示したのは前項で行った単純ばりの実験結果をもとに完全弾塑性モデルとして解析した結果である。算出した仕事量は同一変位で実験結果とよく一致しており、当実験の目的の一つである塑性変形によるエネルギー吸収量の確認という観点からは、単純ばりの実験結果を基にしてエネルギー吸収量をある程度推定できることを示していると考えられる。衝撃実験を含め主として次に示す結論を得た。

- (1) 静的載荷において、反力の大きさや、2 つの塑性ヒンジの形成およびその過程など、構造物全体がほぼ予想された挙動を示し、境界条件などを満たしていることが確認された。
- (2) 圧縮側補強材としての CFST は、終局状態での鉄筋の座屈に比べて比較的健全であったことから、はりの変形能向上に寄与してい

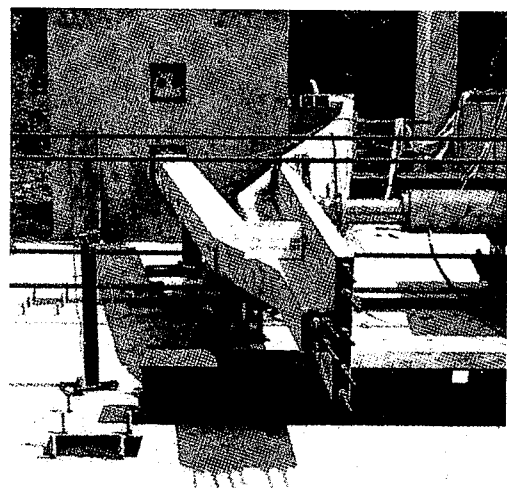


写真-1 静的載荷実験

ると考えられる。

- (3) 単純ばりの実験で得られた荷重－変位関係と、構造系の終局変位は塑性ヒンジの一つが終局回転角に達する時点であるとした弾塑性モデルを用いて、構造系での荷重－変位を推定することと、構造物のエネルギー吸収量を予測することについての可能性が示された。
- (4) 衝撃載荷においても、構造物全体の挙動は、静的載荷とほぼ同じであると考えられ、主桁のせん断破壊は生じなかった。終局状態も静的載荷と同様に方杖接合部のせん断あるいは方杖の圧潰であったが、主桁は静的載荷同様、2つの塑性ヒンジが単純ばりでの終局回転角に達しており、最大曲げ耐力の維持できる範囲までは十分変形していることが確認された。

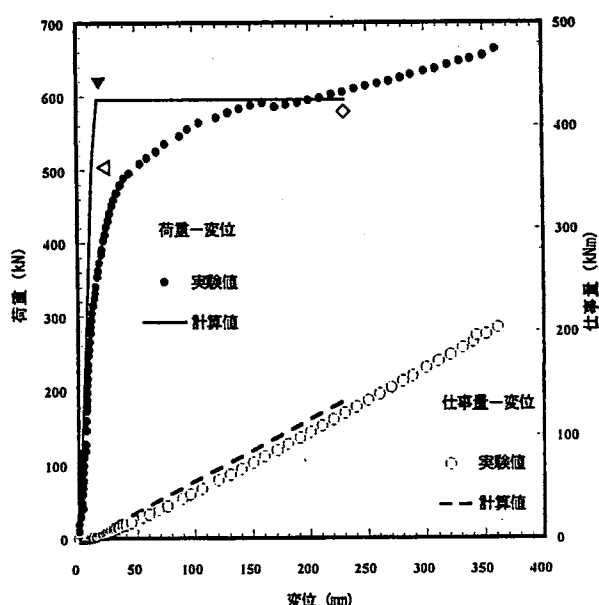


図-7 荷重－変位関係の推定

## 学位論文審査結果の要旨

学位論文審査委員会は平成13年1月26日に第1回審査会を開催し、論文内容について質疑・応答による調査を行った。さらに、平成13年2月1日に行われた口頭発表の後に開催した最終審査会における慎重な協議の結果以下のとおり判定した。

本論文は、落石防護構造物の設計は応力に基づく通常の設計と終局変位に至るまでに吸収されるエネルギーを指標とした設計の2段階設計法が合理的であるという観点から、変形能の優れた鋼管・コンクリート複合部材を開発し、それを景観に優れた片持型落石覆工へ応用するための研究成果をまとめたものである。まず、従来のRCはりの曲げ変形能が十分でない要因が早期に起こるコンクリートの厚潰とそれに続く圧縮鉄筋の座屈であることに着目し、圧縮鉄筋の代わりにコンクリートを充填した円形鋼管(CFST)を用いることを提案している。そしてCFSTを用いた鋼管・コンクリート複合矩形断面はりの変形能がRCはりのそれに比べて優れていることを静的載荷実験および落錘衝撃載荷実験により確認している。また、CFSTとコンクリートの一体化のために鋼管に孔をあけることにより形成されるコンクリートダウエルの効果を実験で確認し、コンクリート強度との関係を求めている。次に、片持型落石覆工を想定した鋼管・コンクリート複合T形および逆T形断面部材の単体および構造系モデルについて静的および落錘衝撃載荷実験を行い、それらの複合部材の終局回転角は構造系の塑性崩壊機構を形成するに十分な変形能を有すること、ならびに単純塑性解析と単体の終局回転角を用いて構造系の終局変位を推定し、吸収エネルギーを評価することが可能であることを示している。

以上の結果は、新しい複合構造形式と2段階設計法の進展に貢献するものである。したがって本論文は博士(工学)の学位に値するものと判定する。